

不同土地利用变化情景下的洪汝河流域水文响应

王高丹¹, 唐彦君², 杨晓英³, 张晓祥⁴

(1. 珠江水利科学研究所, 广东 广州 510611; 2. 淮河水利委员会水文局(信息中心), 安徽 蚌埠 233001;
3. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200433; 4. 河海大学 地理信息科学与工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: [目的] 研究洪汝河流域土地利用变化对水文过程的影响, 为当地水资源的合理规划和利用提供依据和参考。[方法] 本研究以土壤水体评价模型(soil and water assessment tool, SWAT)为基础, 通过设计多种土地利用情景模式模拟洪汝河流域水文情景, 首先利用数字高程模型(digital elevation model, DEM), 土地利用数据、土壤数据以及日气象数据建立模型; 其次选用 2006—2008 年的水文观测数据进行模型率定, 并进行敏感性和不确定性分析; 最后, 设置 4 种土地利用情景模式进行水文模拟。[结果] 退耕还林情景下径流减少 4.23%; 而在耕地增加, 城镇用地增加和以城镇用地、林地草地增加为主的复杂土地利用变化这 3 种情景下, 径流分别增加 3.01%, 4.91% 和 1.50%。[结论] 退耕还林增加了可涵养水源的森林, 使得径流减少, 而增加耕地开垦或城市建设用地则会增加地表径流。

关键词: 水文模型; SWAT; 土地利用变化; 径流模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0082-06

中图分类号: F301.24, P333

文献参数: 王高丹, 唐彦君, 杨晓英, 等. 不同土地利用变化情景下的洪汝河流域水文响应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 82-87. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.015

Hydrological Responses to Various Scenarios of Land Use Change in Hongru River Watershed

WANG Gaodan¹, TANG Yanjun², YANG Xiaoying³, ZHANG Xiaoxiang⁴

(1. Pearl River Water Resources Research Institute of PRWRC, Guangzhou, Guangdong,

510611, China; 2. Bureau of Hydrology(Information Center), Huaihe River Commission, Bengbu

233001, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433,

China; 4. Institute of Geographic Information Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to analyze the impacts of land use change on the hydrological process in the Hongru river basin in order to provide the basis and reference for the rational planning and utilization of local water resources. [Methods] Various scenarios of land use change were designed to simulate the hydrological process in Hongru river watershed based on SWAT(soil and water assessment tool) model. DEM(digital elevation model), land use data, soil data, daily meteorological data were used as the input to establish the SWAT model. Observation data from 2006 to 2008 were used to calibrate and analyze the sensitivity and uncertainty of the established model. Four land use scenarios(S_1 : conversion of degraded farmland into forest; S_2 : increase farmland; S_3 : increase urban land; S_4 : increase urban land, forest, and grassland) were set up for hydrological modeling. [Results] The runoff was expected to decrease by 4.23% in S_1 , while it was expected to increase by 3.01% in S_2 , 4.91% in S_3 and 1.50% in S_4 . [Conclusion] Returning cultivated land to forest and grassland can reduce the runoff, while reclamation or urbanization will increase the runoff.

Keywords: hydrological models; SWAT; land use change; runoff simulation

收稿日期: 2014-11-27

修回日期: 2014-12-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“气候变化对流域水安全影响的不确定性研究”(41201191), “连续型地理物理过程模型与 GIS 的集成”(41201394); 教育部博士点新教师资助项目(20120071120034)

第一作者: 王高丹(1988—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士, 地图学与地理信息系统专业, 主要从事 GIS 与物理过程模型集成、行业数据模型研究。E-mail: wanggaodan@x-gis.com.cn.

通讯作者: 杨晓英(1977—), 女(汉族), 江苏省宿迁市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源与流域污染控制方面研究。E-mail: xiaoying@fudan.edu.cn.

人类在流域内的所有活动,如水保工程、流域河道整治、跨流域调水、地下水开采、灌区建立、水库塘坝等蓄水工程,一般都会导致流域下垫面发生改变,引发流域土地利用/覆被变化(land-use and land-cover change, LUCC),从而改变流域的地表蒸发、截留、填洼下渗等产汇流条件、河道的汇流过程和水资源的空间分布^[1]。进而引发一系列的环境、生态效应。评估土地利用变化对水文过程的影响并了解其规律,将大大提高土地利用类型对水文过程影响的可预见性,有助于水资源合理规划和利用,促进区域可持续发展。

研究 LUCC 对流域水文循环产生的影响,一般采用分项调查法、试验流域法、水文模型法^[2]等方法。其中,分项调查法和试验流域法需要详细的长时期观测资料,人力物力成本较高;水文模型法具有较好的物理基础,在对模型进行充分的率定和验证的前提下,很容易实现 LUCC 对水文循环的影响的定量分析,因而成为该领域研究的主流方法^[3]。该方法中,根据研究需要合理选择水文模型是一个非常关键的问题。分布式水文模型的参数和输出结果更容易与遥感和 GIS 结合,可灵活地设置土地利用变化情景,模拟不同土地利用变化情景下的水文响应^[4],因此成为研究 LULC 水文响应的重要工具。

目前,使用较广泛的基于物理机制的分布式水文模型有 SHE 模型、IHDM 模型、TOPMODEL 模型、SWAT 模型、VIC 模型等^[5]。SWAT(soil and water assessment Tool)模型开发于 90 年代初^[6],其目的是预测大尺度^[7]、无测站流域的水^[8]、泥沙、营养物和农药管理^[9]、景观生态^[10]的影响,它具有基于物理过程、输入数据易获取、对大流域的计算效率高、连续模拟^[11]的特点。此外,SWAT 模型还具有:① 作为综合的水文模型可以模拟定量和定性的水文平衡项^[12];② 结合 ArcGIS 的操作界面便于空间分布信息的预处理和后处理;③ 可以模拟不同子流域某种参数变化所带来的影响^[13]的特点。中国学者已经对 SWAT 模型在中小尺度流域中土地利用变化对水文过程的影响做了一些研究^[14],其结果表明土地利用在森林、农田、建设用地之间的转换对流域产水产沙的影响较大^[15],因此本文拟选用 SWAT 模型进行洪汝河流域的水文模拟。

为了研究洪汝河流域土地利用变化对水文过程的影响,在对水文模型进行参数率定和校正验证的基础上,设计不同 LUCC 情景模式进行水文模拟,并比较结果,获得洪汝河流域土地利用变化的水文响应规律。其结果可以为地方土地利用规划提供参考,通过

改善调整土地利用方式,实现保护水资源、合理规划和利用水资源的可持续发展。

1 SWAT 模型原理

SWAT 模型主要包括 4 大功能模块^[16-17]: ① 气象模块;② 陆面水文循环模块:水文循环过程的计算采用正的 SCS 径流曲线数值方程和 Green-Ampt 入渗方程;土壤水的分配使用蓄满产流机制,壤中流计算采用 Sloan 等提出的动态存储模型;回归流的模拟采用 Arnold 等提出的地下水分水理论;模型利用 Hargreaves, Priestley-Taylor 或 Penman-Monteith 方程计算潜在蒸散量,实际蒸散量的计算分为土壤的蒸发、植被截留与植物蒸腾 3 部分;③ 管理模块;④ 水体过程。本研究主要涉及陆面水文循环模块,其他模块只做简要介绍。

SWAT 模型遵循水量平衡原理,水文过程子模型主要分为陆地汇流阶段和河道演算阶段 2 部分。前者为降雨的截留、下渗、汇流、蒸散发、基流等过程,后者指河道内的水和泥沙等运动到出口的过程^[17]。SWAT 模型中的水量平衡公式如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_s - E_a - W_s - Q_g) \quad (1)$$

式中: SW_t ——最终的土壤含水量(mm); SW_0 ——土壤前期含水量(mm); t ——时间步长(d); R_d ——第 i 天的降雨量(mm); Q_s ——第 i 天的地表径流(mm); E_a ——第 i 天的蒸发量(mm); W_s ——第 i 天位于土壤剖面底层的渗透量和侧流量(mm); Q_g ——第 i 天的基流量(mm)^[18]。

对于模型中的其他过程,如冠层存储、蒸散发、潜在蒸散发、地表径流、土壤下渗、壤中流等计算公式本文不予赘述,详见 SWAT 用户手册^[17]。

2 研究区与基础数据

2.1 研究区概况

洪河、汝河皆为淮河上游支流,位于河南省驻马店市境内,两条河在新蔡县班台村交汇为大洪河流入淮河。洪汝河流域地处北亚热带与暖温带的过渡地带,年平均气温为 15 ℃,多年平均降雨量为 920 mm;常年主导风向冬季为西北风和北风,夏季为东南风和南风,最大风速 25 m/s;全市多年平均地表径流深 257.4 mm,汝河多年平均径流深 267.6 mm,洪河多年平均径流深 216.8 mm^[19];主河道长度 576 km,流域面积 10 217 km²。

驻马店地区的土壤类型有黄棕壤土、沙姜黑土、潮土、粗骨土、石质土、水稻土 6 个大类,前两者分布

最广。全区域森林覆盖率约 19% 左右,大部分地区开垦为农用地,主要栽培小麦、玉米、花生、大豆、棉花等农作物,西部为低山丘陵,东部为广阔平原,海拔为 33~79 m。流域内包括 3 大水库,西部有板桥水库、南部有薄山水库、中部有宿鸭湖水库(图 1)。

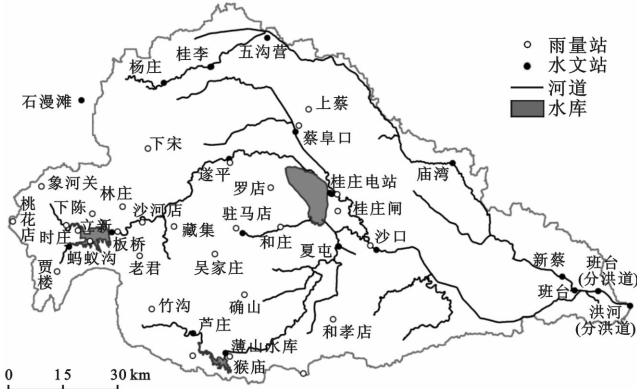


图 1 研究区位置概况及监测站点分布

2.2 输入数据及预处理

输入模型的所有数据文件必须基于相同的地图

投影和坐标系,所有数据转换为 Albers 等积圆锥投影,栅格数据统一使用 ArcGIS 转换为 30 m 大小栅格单元,使得 SWAT 模型的空间分辨率一致。空间数据的各项具体参数如表 1 所示。

首先需要对输入数据进行预处理,使其符合 SWAT 模型的输入数据要求。

其次,根据 SWAT 的土地覆盖/植被类型对研究区域的土地覆盖/利用数据进行类别的对照索引,以用于在建模的过程中重分类。土壤数据是中国标准的土壤分类,其中土壤粒子大小分级与 SWAT 内的美国标准一致。应先行建立土壤属性数据库,来存储不同土壤类型的一系列物理、化学属性。主要包括土层厚度、土壤湿容重、有效含水量、饱和导水率、土壤粒子、土壤湿反照率、可蚀性因子 K 等,对于 SWAT 模型中的水循环、蒸散发模拟起着重要作用。土壤属性数据大多满足建模需求,仅缺少土壤层有效含水量(SOL_AWC)、土壤有机碳含量(SOL_CBN)、土壤湿反照率(SOL_ALB)这几种必需属性,需要使用土壤水特性计算软件 SPAW 基于已有属性,进行转换和推算。

表 1 研究数据信息

数据名称	分辨率	数据类型	数据来源
地形数据(DEM)	30 m	ESRI grid	中国科学院计算机网络信息中心
TM 遥感影像(2011 年)	30 m	Tif	USGS(美国地质勘探局)网站
土地利用/覆被图(2005 年)	1:10 万	ESRI grid/shapefile	中国科学院遥感所
土壤类型分布图	1:100 万	ESRI grid/shapefile	中科院南京土壤研究所
淮河流域水系图	1:25 万	shapefile	中国科学院计算机网络信息中心
雨量/水文站点数据	日、月	Shapefile、表格	中国水文年鉴(淮河流域水文资料)
气象站监测数据	日	Shapefile、表格	驻马店市气象局
气象数据(1958—2013 年)	日	表格	中国气象科学数据共享服务网

气象数据包括各站点位置和观测数据表。使用位于流域形心处的驻马店气象站的实测气象数据,包括逐日最高、最低气温,平均气温,平均相对湿度,平均风速数据以及根据该站点的日照时数推算得到的太阳辐射值^[20]。雨量数据摘自于 2001—2011 年的淮河流域水文年鉴,共 29 个雨量站点的实测逐日降雨量。此外,利用驻马店站 1958—2013 年的气象数据,计算多年逐月气象资料:每月日均降雨量、每月日均最高最低温度、每月日均露点温度、每月日均风速等气象统计数据,用于建立 SWAT 天气发生器,以模拟和填补缺失时段的气象数据。

3 SWAT 模型的建立

3.1 模型构建

SWAT 模型根据河水系将研究流域划分为多个子流域,各子流域内有不同的水文、气象、土壤、作物生长、农业管理措施、农药施用等,子流域根据地面覆盖、土壤类型、地形等因素为不同的水文响应单元

(hydrologic response units, HRU),每一个 HRU 单独计算水分循环的各个部分及其定量的转化关系,然后进行汇总演算,求得流域的水分平衡关系。各 HRU 在垂直方向上分为植物冠层、根系层、渗流层、浅蓄水层、隔水层和深蓄水层^[18]。

本研究中,使用 DEM 数据完成河网划分,采用 1:250 000 真实河网数据对自动提取的河网进行校正。使用 2005 年的土地利用数据和土壤数据对流域进行 HRUs 离散化,并依次输入经过预处理的气象数据、水库数据等。最终建成的水文模型分为 56 个子流域,1 152 个水文响应单元。

SWAT 模型的径流曲线数法(SCS)计算地表径流,选择彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)公式计算潜在蒸散发,并采用变动蓄量(Variable Storage)模型演算河道汇流。

3.2 模型参数率定

选择分布于流域中下游的 5 个水文站点:遂平、

沙口、庙湾、新蔡、班台的实测月径流数据用于敏感性分析和校准。使用 SUFI-2 算法,考虑了所有参数不确定性的来源,使用 T 检验方法判断个参数的敏感性,通过 P-factor(95%预测不确定性内的监测数据百

分比)衡量所有不确定性的程度,R-factor(95 PPU 带的平均厚度初一监测数据标准偏差)衡量校准/不确定性分析效果。经过 1 000 次迭代计算,得到的参数敏感性分析统计表(表 2)。

表 2 模型参数敏感性分析及率定结果

参数名称	T 值	p 值	值域/变化范围	最佳取值
径流曲线(CN2)	16.03	0.00	35~98	36.86~53.63
基流 alpha 因子(ALPHA_BF)	27.20	0.00	0~1	0.75
地下水延迟时间(GW_DELAY)	-44.23	0.00	0~500	51.10
浅层地下水产基流的阈值深(GWQMN)	1.29	0.20	0~5 000	1.31
浅层地下水再蒸发系数(GW_REVAP)	-0.02	0.98	0.02~0.2	0.15
土壤蒸发补偿系数(ESCO)	-4.05	0.00	0~1	0.80
主河道河床曼宁系数(CH_N2)	-1.09	0.28	-0.01~0.3	0.26
主河道河床有效水力传导度(CH_K2)	-2.98	0.00	-0.01~500	146.66
土壤饱和水力传导度(SOL_K)	-11.28	0.00	0~2 000	31.45~76.34

从表 2 可以看出,敏感度最高的参数是:地下水延迟时间(GW_DELAY);其次是基流 alpha 因子(ALPHA_BF);再次是径流曲线(CN₂);其他参数如土壤饱和和水力传导度(SOL_K)等由于涉及到土壤的下渗、以及持水能力也比较敏感。其中,CN₂ 和 SOL_K 的最佳取值对每个小流域各有其相应的值,因此在表 2 中为一个最佳取值范围。

3.3 模拟结果验证

使用 2009—2011 年实测数据,选取 P-factor, R-factor, 纳什效率系数 ENS, 相关系数 R² 这 4 个评价

指标,对模型参数进行验证。指标评价结果见表 3, 班台站率定期和验证期的模拟结果与实测值比较见图 2。P-factor 的取值区间为 0%~100%,越接近于 1 效果越好;R-factor 的变化范围为 0~∞,越接近于 0 越好;ENS 和 R² 的值接近于 1,表示模拟值与实测值之间的差距较小。一般认为 ENS 在 0.5 以上可以接受,在 0.65~0.75 之间较好,在 0.75 以上的模拟效果非常好^[21]。由图 2 和表 3 可见,5 个站点的模拟效果非常好,说明 SWAT 模型适用于洪汝河流域的径流模拟。

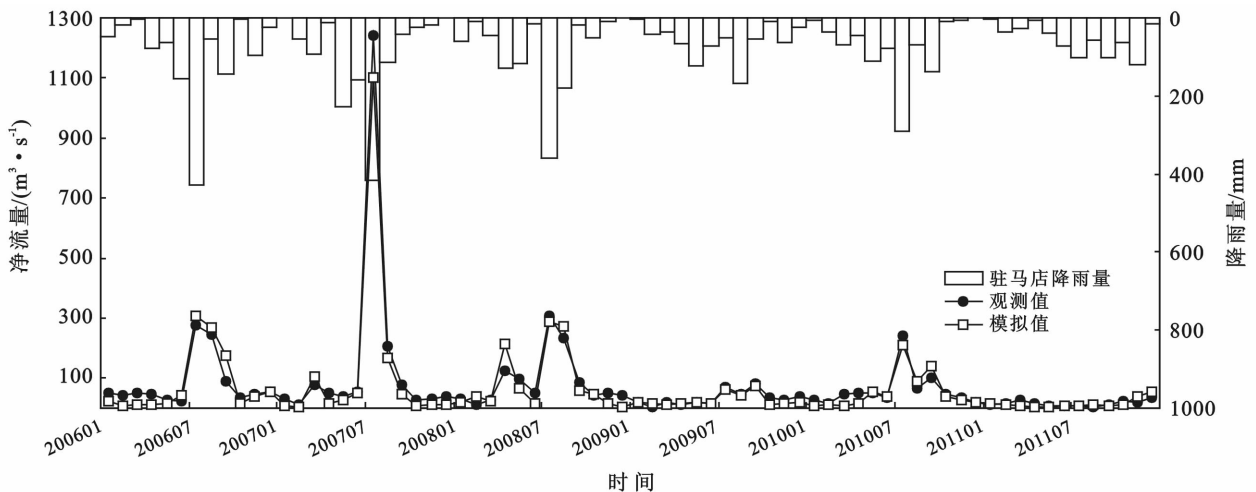


图 2 班台站 2006—2011 年降雨量、月径流量实测值与模拟值

表 3 参数率定及验证结果

站点	校准期(2006—2008 年)				验证期(2009—2011 年)			
	P-factor	R-factor	ENS	R ²	P-factor	R-factor	ENS	R ²
遂平	0.58	0.5	0.86	0.87	0.59	0.47	0.63	0.89
沙口	0.78	0.56	0.94	0.95	0.68	0.63	0.91	0.93
庙湾	0.86	0.45	0.92	0.94	0.79	0.56	0.87	0.92
新蔡	0.89	0.39	0.88	0.96	0.86	0.44	0.83	0.95
班台	0.92	0.49	0.96	0.97	0.87	0.47	0.93	0.95

4 情景设计

4.1 土地利用变化情景

人类活动影响主要体现在土地利用变化上,为了定量研究该流域土地利用变化对径流的影响,本文以流域近年来真实土地利用变化状况、中国“退耕还林”政策、《河南省土地利用总体规划(2006—2020年)》

和《驻马店市城市总体规划(2010—2030)》为依据,设计了4种土地利用变化情景(表4—5):

(1) 退耕还林。坡度在 25° 以上的坡耕地(含梯田)、水土流失严重土地,设为林地;坡度 $15^\circ\sim 25^\circ$ 之间的浅山、丘陵区坡地设为园地;其他保持不变。

(2) 适度开发耕地。将坡度小于 15° 的未利用地、湿地、设为耕地,其他保持不变;

表 4 不同情景下的各土地利用类型面积

土地利用类型	土地面积/ km^2				
	基准	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
耕地	11 296.17	11 164.75	11 590.59	11 316.54	11 034.24
有林地	722.01	727.87	544.58	722.01	891.30
灌木林	207.38	207.38	161.80	207.38	189.28
疏林/园地	215.49	341.04	206.66	215.49	185.39
草地	518.45	518.45	455.97	518.45	436.40
水域	314.73	314.73	314.73	314.73	287.25
湿地	71.87	71.87	71.87	71.87	29.35
城镇用地	134.14	134.14	134.14	316.12	159.14
农村居民点	1 586.71	1 586.71	1 586.71	1 386.42	1 808.19
交通用地	10.31	10.31	10.31	10.31	56.64

表 5 各个情景下土地利用类型变化量

主要变化	情景 1		情景 2	情景 3		情景 4	
	耕地— 林地	耕地— 园地	未利用地— 耕地	其他地类— 城镇用地	农村居民 点—耕地	城镇农村 增加	林地草地 增加
面积/ km^2	5.86	125.55	294.42	181.98	20.37	240.48	169.29
变化率/%	0.04	0.83	1.95	1.21	0.14	1.59	1.12

(3) 城镇聚集化建设。依据驻马店城市规划,撤销部分自然村,合并发展中心村,改善农田破碎不集中的现状。驻马店市中心城区向北方发展,扩大城市面积至 120 km^2 ,县级城镇也相应扩张,其他地类保持不变;

(4) 实际发展变化。使用2011年遥感影像解译分类获得驻马店地区土地利用变化图。在这4种不同土地利用情景模式下,采用已经率定的参数结果,分别对洪汝河流域进行水文模拟试验,并与基准数据(原模型中使用的2005年土地利用数据)进行对比。

4.2 结果分析

采用率定好的参数和设计的不同土地利用数据,

分别模拟洪汝河流域在4种土地利用情景下的月径流,以流域出口为断面计算其多年平均径流深,并将结果与基于2005年土地利用数据建立的SWAT模型的模拟结果进行对比分析,结果如表6所示。

(1) 在以“生态退耕”为依据的情景1中, 131.41 km^2 的耕地转为林地和园地后,径流减少4.23%,说明林地和灌木林具有涵养水分、减少径流量以及防洪的生态效应。

(2) 在以“适度开发耕地”为依据的情景2中, 294.42 km^2 未利用地转为耕地后,径流增加6.93%,径流变化较大,说明耕地的增加削弱了森林草地的防洪效应,减少了下渗;

表 6 不同情景下汝河流域的年平均径流深变化量

原模拟值/ mm	情景 1		情景 2		情景 3		情景 4	
	模拟值/mm	变化率/%	模拟值/mm	变化率/%	模拟值/mm	变化率/%	模拟值	变化率/%
230.26	220.52	-4.23	238.19	3.01	241.56	4.91	233.71	1.50

(3) 在以“城镇聚集化建设”为依据的情景 3 中, 181.98 km² 土地变为城镇建设用地, 20.37 km² 农村居民点变为耕地后, 径流增加 11.31%, 主要是因为耕地和建设用地的增加导致下渗减少、洪峰流量增大、径流系数增大等, 从而导致径流增加。此种情景下的土地利用方式, 虽然径流增加了, 其经济效益也会增加。

(4) 在“实际发展变化”的情景 4 中, 使用的是该流域 2011 年实际土地利用情况, 城镇农村增加 240.48 km², 林地草地增加 169.29 km², 耕地稍有减少, 其他地类面积均有微小变化, 结果中径流增加 1.50%。

由此可知, 土地利用变化对水文过程影响比较显著。该结果中 LUCC 和径流量的相关变化规律与类似研究结论一致^[22], 证明本研究具正确性和参考价值。

5 结论

通过在洪汝河流域建立 SWAT 模型, 结合设置的 4 种土地利用变化情景, 模拟了洪汝河流域的径流在各情景下的响应。

其中, 情景 1 中随着林地和园地面积的增加, 径流深模拟输出减少 9.47 mm; 情景 2 中, 随着耕地和建设用地的增加, 径流深模拟输出增大 6.93 mm; 情景 3 中, 随着耕地面积的增加, 径流深模拟输出增大 11.31 mm; 情景 4 中, 林地草地和建设用地的面积都有所增加的情况下径流深模拟输出增大 3.45 mm, 该情景结果分析时应考虑遥感影像分类精度的影响, 结果准确度比其他情况略低。

由此可见, 洪汝河流域土地利用变化对径流变化作用明显, 尤其是汝河中上游山地的林地和草地面积以及驻马店城区建设用地面积的增加对径流的影响比较突出。中国很多河流因为不合理的开发或者占用, 产生了断流、干涸、河床变窄或者退化等影响, 此类现象多对当地水资源利用、防洪抗旱、城市发展起到消极的作用。已有很多实例证明, 不合理的土地利用规划造成局部区域的生态系统紊乱, 灾害频发, 污染现象严重, 不利于区域的可持续发展和经济的科学增长。因此, 在土地利用规划中不能单方面强调经济效益, 更需要充分认识人类活动对水资源的影响, 兼顾流域水文效应、洪水干旱灾害等生态系统的平衡。

[参 考 文 献]

[1] 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 800-811.

- [2] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285.
- [3] 陈昊, 南卓铜. 水文模型选择及其研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 397-404.
- [4] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017.
- [5] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 168-173.
- [6] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment: Part II [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 91-101.
- [7] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African subcontinent using the SWAT hydrologic Model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 30-49.
- [8] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(06): 1559-1567.
- [9] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin(Tunisia)[J]. Physics and Chemistry of the Earth: Parts A/B/C, 2005, 30(8/10): 497-507.
- [10] Weber A, Fohrer N, Möller D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors: effects on landscape structures and functions [J]. Ecological Modelling, 2001, 40(1): 125-140.
- [11] Nie Wenming, Yuan Yongping, Kepner W, et al. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. Journal of Hydrology, 2011, 407(1/4): 105-114.
- [12] Mimikou M, Panagopoulos I, Bekiaris I. Application of the SWAT (Soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden[J]. Globalnest International Journal, 2005, 7(3): 313-322.
- [13] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-35.
- [14] 杨宏伟, 许崇育. 东江流域典型子流域土地利用/覆被变化对地表径流影响[J]. 湖泊科学. 2011, 23(6): 991-996.
- [15] Cai Tao, Li Qiongfang, Yu Meixiu, et al. Investigation into the impacts of land-use change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 53(6): 1-9.
- [16] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(01): 79-86.

- [8] 王宜伦,张许,谭金芳,等. 农业可持续发展中的土壤肥料问题与对策[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 278-281.
- [9] 华元刚,潘长兵,贝美容,等. 橡胶园砖红壤中磷和钾素径流失特征研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(9): 1540-1547.
- [10] Hussien R A, Donia A M, Atia A A, et al. Studying some hydro-physical properties of two soils amended with kaolinite-modified cross-linked poly-acrylamides[J]. *Catena*, 2012(92):172-178.
- [11] Paluszczek J. Physical quality of eroded soil amended with gel-forming polymer[J]. *International Agrophysics*, 2011, 25(4):375-382.
- [12] Tao Jiang, Teng Lingling, Wei Shiqiang, et al. Application of polyacrylamide to reduce phosphorus losses from a Chinese purple soil: A laboratory and field investigation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(7):1437-1445.
- [13] Islam M R, Mao Shuaisi, Xue Zhangxu, et al. A lysimeter study of nitrate leaching, optimum fertilisation rate and growth responses of corn(*Zeamays L.*) following soil amendment with water-saving super-absorbent polymer[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2011, 91(11):1990-1997.
- [14] Tyliszczak B, Polaczek J, Pielichowski J, et al. Preparation and properties of biodegradable slow-release PAA super absorbent matrixes for phosphorus fertilizers[J]. *Macromolecular Symposia*, 2009, 279(1):236-242.
- [15] Guilherme M R, Reis A V, Paulino A T, et al. Pectin-based polymer hydrogel as a can ier for release of agricultural nutrients and removal of heavy metals from wastewater [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 117(6):3146-3154.
- [16] Liang Rui, Liu Mingzhu. Preparation of poly(acrylic acid-co-acrylamide)/kaolin and release kinetics of urea from it[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 106(5):3007-3015.
- [17] Ni Boli, Liu Mingzhu, Lu Shaoyu, et al. Novel slow-release multielement compound fertilizer with hydroscopicity and moisture preservation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(10):4546-4552.
- [18] 何绪生,廖宗文,黄培钊,等. 一种新型保水缓释氮肥有关特征及性能[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(10):2048-2055.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 郑国亮,华元刚,林钊沐,等. 保水剂 A 对橡胶树专用肥养分溶出的影响[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(9):1841-1847.
- [21] 何向东,吴小平. 海南垦区胶园肥力演变探研[J]. *热带农业科学*, 2002, 22(1):16-22.

(上接第 87 页)

- [17] Winchell M, Srinivasan R, Luzio M D, et al. ArcSWAT Interface for SWAT2012-user's Guide [Z]. 2013.
- [18] 李呈罡. SWAT 模型在黑河中上游流域的改进与集成模拟研究[D]. 南京:南京师范大学, 2012.
- [19] 驻马店市水利基本资料汇编[EB/OL]. 驻马店市水利网, http://www.zmdslj.gov.cn/City_View.asp (2014-12-19)
- [20] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证[J]. *水文*, 2007, 27(5):25-30.
- [21] 左德鹏,徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2012, 48(5):480-496.
- [22] 万荣荣,杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(3):25-33.